

УДК 628.987

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-73-81

Новый критерий качества освещения и его апробация в лабораторных условиях

В.П. Будак, В.С. Желтов, Т.В. Мешкова, В.Д. Чембаев

Современный показатель UGR учитывает в сложных сценах дискомфорт от бликов, разбивая источники произвольной формы на неравномерной яркости, отличные от малоугловых, на малоугловые, и принимая распределение их яркости за равномерное. Поэтому UGR может быть неинформативен в помещениях, где используются материалы с высоким коэффициентом отражения, и в которых необходимо учитывать яркость по всем направлениям пространства в каждой точке сцены для оценки качества освещения. Появляются необходимости расширения показателя UGR для подобных специальных сцен, введения нового критерия качества освещения, основанного на физическом смысле понятия дискомфорта от блестящих источников.

Ощущение дискомфорта можно определить только экспериментальным путем, поэтому на кафедре светотехники НИУ «МЭИ» смонтирована экспериментальная установка на основе светодиодов для проведения исследования яркости на границе комфорт – дискомфорт от источников малоугловых размеров и произвольной формы. Результаты проведенных экспериментов позволили сделать вывод о возможности использования экспериментальной установки и методики проведения эксперимента для дальнейших исследований критерия качества освещения на основе пространственного-углового распределения яркости в поле зрения наблюдателя.

Ключевые слова: показатель дискомфорта, неравномерное распределение яркости, критерий качества освещения, блестящий источник, светодиоды.

Для цитирования: Будак В.П., Желтов В.С., Мешкова Т.В., Чембаев В.Д. Новый критерий качества освещения и его апробация в лабораторных условиях // Вестник МЭИ. 2020. № 1. С. 73—81. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-73-81.

A New Lighting Quality Criterion and its Approbation under Laboratory Conditions

V.P. Budak, V.S. Zheltov, T.V. Meshkova, V.D. Chembraev

The currently applied unified glare rating (UGR) takes into account discomfort from glare in complex scenes by breaking up arbitrarily shaped sources with non-uniform luminance that differ from small-angle ones into small-angle ones and assuming their luminance distribution to be uniform. Therefore, the UGR may turn to be insufficiently informative in rooms containing materials with high reflectivity, the lighting quality in which should be assessed taking into account the luminance at each point of the scene in all spatial directions. There is a need to broaden the UGR content for such scenes and to introduce a new lighting quality criterion based on the physical sense of the discomfort concept from brilliant sources. Since the feeling of discomfort can only be determined experimentally, an experimental setup based on LEDs was constructed at the NRU MPEI Department of Lighting Engineering for studying the luminance at the comfort-discomfort boundary from small-angle sized and arbitrarily shaped sources. A conclusion has been drawn from the results of the accomplished experiments that the developed experimental setup and technique can be used for further investigations of the lighting quality criterion based the spatial-angular distribution of luminance in the observer's field of view.

Key words: glare rating, non-uniform luminance distribution, lighting quality criterion, glaring source, LEDs.

For citation: Budak V.P., Zheltov V.S., Meshkova T.V., Chembraev V.D. A New Lighting Quality Criterion and its Approbation under Laboratory Conditions. Bulletin of MPEI. 2020;1:73—81. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-73-81.

Введение

Качественные показатели освещения в помещениях во многом определяются правильным выбором светильников, при этом регламентируемое или предельно-допустимое значение многих из них выявляется экспериментальным путем. Ярким тому примером служит формула для оценки дискомфорта от блескости — рекомендованный МКО обобщенный показатель дискомфорта UGR (Unified Glare Rating). Современный показатель UGR не учитывает распределение яркости блестящего источника. Согласно допущениям все блестящие источники в поле зрения наблюдателя принимаются за точечные с равномерным распределением яркости:

$$UGR = 8 \lg \left[\frac{0,25}{L_a} \sum_{i=1}^N \frac{L_i^2 \omega_i}{p_i^2} \right],$$

где L_a — средняя яркость поля адаптации наблюдателя, кд/м²; N — число пятен в поле обзора наблюдателя; L_i — средняя яркость i -го пятна повышенной яркости в направлении наблюдателя, кд/м²; ω_i — телесный угол, ограничивающий i -ое пятно относительно наблюдателя, ср; p_i — индекс позиции i -го пятна относительно линии зрения наблюдателя по Гуту.

Данная формула справедлива только для источников, размеры которых лежат в диапазоне $0,003 \leq \omega \leq 0,1$.

М. Лекиш и Л. Холладей были первыми применившими психофизическую оценку для дискомфорта [1].

Они разработали шкалу комфорт/дискомфорт или градацию ощущения от едва заметного до невыносимого и болезненного. Это исследование стало предпосылкой комплексного измерения ощущения дискомфорта, с которого началось развитие системы вероятности визуального комфорта (Visual Comfort Probability) (далее ВВК) [2]. В экспериментах М. Лекиша и С. Гута в 1949 г. исследовалось влияние различных факторов на восприятие яркости блеского источника при изменении яркости самого источника на границе комфорт/дискомфорт в диапазоне от 1000 до 6000 кд/м², уточненная формулировка которой и легла в основу современного показателя UGR.

Можно провести аналогию, что по своей природе блескость для света то же самое, что и шум для звука [3]. С этой точки зрения для описания ощущения дискомфорта подходит модель VPC (Visual Comfort Probability), официально рекомендованная Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), формула которой напоминает нормальное распределение:

$$VCP = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_0^G e^{-t^2/2} dt,$$

где верхний предел интеграла $G = 6,374 - 1,3227 \ln DGR$ определяется через показатель DRG (Discomfort Glare Rating):

$$DGR = \left[\sum_{i=1}^N \frac{0,5L_i Q_i}{P_i L_a^{0,44}} \right]^{N^{0,0914}},$$

где $Q = 20,4\omega + 1,52\omega^{0,2} - 0,075$; L_a — габаритная яркость светящей части i -го светильника в направлении глаз наблюдателя, кд/м²; ω_i — телесный угол светящихся частей i -го светильника из точки наблюдения (стерадиан), ср; L_i — яркость фона (кд/м²), рассчитываемая $E_{ind} \pi^{-1}$, где E_{ind} — отраженная составляющая вертикальной освещенности на уровне глаз стандартного наблюдателя. Отраженная составляющая вертикальной освещенности на высоте линии зрения стандартного наблюдателя принята равной отраженной вертикальной освещенности стен на данной высоте; N — число светильников в осветительной установке.

Критерий качества освещения

В источнике [4] предложен новый критерий качества освещения на основе анализа пространственно-углового распределения яркости, который впоследствии претерпел незначительные корректировки. Первая формулировка критерия качества появилась на основе исследований на кафедре светотехники НИУ «МЭИ» в 2016 г. [5, 6]. Согласно новому критерию качество освещения может быть оценено из заданной точки в пространстве сцены в заданном направлении как

$$Q = \frac{1}{K_{пор}} \int K(x, y) h(x, y) dx dy,$$

где $K_{пор}$ — пороговое значение контраста; h — весовая функция, позволяющая учитывать светотехническую задачу; $K(x, y)$ — обобщенный контраст в точке сцены,

$$K(x, y) = \frac{|\text{grad}(L(x, y)p(x, y))|}{\bar{L}}.$$

Средняя яркость равна

$$\bar{L} = \frac{1}{A} \int_{(A)} L(x, y) p(x, y) dx dy; \quad A = \int_{(A)} dx dy.$$

Переменные x, y определяются в плоскости анализа кадра изображения, видимого из исследуемой точки, в заданном направлении; $p(x, y)$ — функция, связанная с неравномерностью плотности распределения колбочек и палочек по сетчатке глаза [7 — 10].

В предложенном критерии любое изменение яркости дает вклад в результат. При этом очевидно, что перепады яркости ниже некоторого порога не вносят дискомфорта в восприятие. Ограничим их влияние:

$$K(x, y) = \begin{cases} L(x, y) \leq L_{пор} \rightarrow 0; \\ (x, y) > L_{пор} \rightarrow K(x, y). \end{cases}$$

Ощущение дискомфорта — субъективная оценка, получаемая только экспериментальным путем, поэтому для проверки гипотезы о критерии качества освещения необходимо провести эксперимент по набору статистики психофизических ответов [11 — 15].

Поскольку критерий качества освещения может быть принят в виде одного интегрального значения для произвольной сцены освещения с известным распределением яркости для каждой точки пространства в каждом направлении, то в эксперименте должны проводиться оценки качества освещения от источников света произвольных размеров и равномерной и неравномерной яркости в одной сцене освещения с различных ракурсов, выполнения зрительной работы при условии изменения яркости фона, яркости, размеров и положения блеского источника/источников [16].

Согласно принципу соответствия Нильса Бора, любая новая научная теория обязана включать старую теорию и ее результаты как частный случай, поэтому современный эксперимент должен повторять и расширять классический эксперимент [17].

Проверка и расширение классической теории

На кафедре светотехники НИУ «МЭИ» смонтирована экспериментальная установка для проведения исследования дискомфортных ощущений от блеских источников различной формы и яркости в поле зрения наблюдателя. Целиком установка представляет собой квадратный металлический лист 2×2 м, покрашенный белой порошковой краской, на котором смонтированы светодиодные платы различной конфигурации по расположению светодиодов. Размеры плат подбирали

таким образом, чтобы была возможность смоделировать условия проведения эксперимента М. Лекиша и С. Гута 1949 г.

Размер круглых плат аналогичен размерам отверстий в фотометрической сфере, через которые наблюдателю предъявлялись блеские источники в классическом эксперименте, и имеют диаметр 3,76 см. Для усреднения яркости светодиодов по площади и направлению излучения наложено матированное стекло толщиной 3 мм с коэффициентом пропускания 70%.

Экспериментальная установка имеет возможность группового включения и диммирования с помощью встроенного диммера для плавного регулирования яркости блеских источников.

Яркость фона создается общим освещением классной комнаты с помощью 6 диммируемых встроенных светодиодных светильников ОПТИМА ECO LED ООО «МГК «Световые Технологии» нейтрального белого света (КТЦ — 4000 К).

Градуировка установки по яркости выполнена с помощью яркомера Konika Minolta LS-110.

Результаты экспериментов М. Лекиша и С. Гута показывают, что распределение значений стандартной яркости на границе комфорт/дискомфорт (ГКД) близко к нормальному (рис. 1). Это значит, что на данную яркость влияет множество независимых друг от друга факторов, но установить какое-то одно определенное значение затруднительно. Доверительный интервал со-

ставляет 3052 ± 863 кд/м². Из расчета следует, что разброс оценок наблюдателей в данном случае — 28%.

В современном эксперименте блеский источник установлен в центральной части установки на высоте 700 мм от поверхности стола и 1450 мм от пола. Остальные источники выключены и не вносят вклад в яркость фона. Таким образом, экспериментальная окружающая среда состоит из однородного поля яркости с круглой яркой областью, периодически накладываемой на него.

Экспериментальная методика включает оценку ощущения дискомфорта от источника при кратковременном появлении блеского источника в поле зрения наблюдателя при условии равномерного распределения яркости фона.

При кратковременном воздействии источника яркость адаптации принимали равной яркости фона. Испытуемому требовалось оценить первоначальное ощущение яркости от блеского источника, когда источник моментально включался для наблюдения на фоне окружающего поля равномерной яркости.

Таким образом, моделировалась ситуация, аналогичная эксперименту М. Лекиша и С. Гута, когда взгляд работника отрывался от яркости адаптации большой площади, такой как рабочий стол, и видел источник более высокой яркости, оценивая свое ощущение, полученное в ходе краткого периода, когда наблюдался источник [18 — 20].

**Выборка из распределения
N(3051,76898004222;1092,64358788751). Доверительный
интервал для Среднего. Сигма известна. Уровень значимости
5,00%**



Рис. 1. Расчет доверительного интервала для распределения значений стандартной яркости ГКД (Standard BCD Brightness») в эксперименте М. Лекиша и С. Гута. Условия эксперимента: источник (Ø 3,76 см) расположен на линии зрения наблюдателя, расстояние от наблюдателя до источника — 1 м, яркость адаптации — 31,4 кд/м²

Выбрана оптимальная шкала дискомфорта и определена интерпретация каждого из делений шкалы для инструктажа наблюдателей, исходя из предварительных исследований с помощью расширенной шкалы Холледея [1]:

- едва заметно (граница видимости и невидимости источника);
- безразлично (граница между ощущениями привлекает/не привлекает внимание; комфортно);
- дискомфортно (нет сомнений);
- неудобно/неудовлетворительно (загрундяет читать предложенный текст);
- невыносимо (граница ощущений неприятно/болезненно; выполнение зрительной работы невозможно).

Наблюдатель располагался на расстоянии 1 м от установки на стуле (рис. 2), высота которого регулировалась таким образом, чтобы блеский источник находился на уровне зрения. Наблюдатель плавно диммировал яркость центрального источника до тех пор, пока не регистрировал первое ощущение — «едва заметно», затем аналогичным образом измеряли значения яркости для остальных ощущений. Точно под блеским точечным источником размещали надпись «эксперимент». Она необходима для условия выполнения зрительной работы, поскольку предложенный критерий качества направлен на оценку качества освещения при наблюдении осветительной установки и выполнении зрительной задачи.

Среднее значение ГКД, достигнутое в эксперименте, — 3619 кд/м², что соответствует среднему значению яркости ГКД эксперимента М. Лекиша и С. Гутта — 3052 кд/м². Таким образом, доказана правильность выбранной методики.

Для подтверждения полученных результатов собрана статистика из 41 наблюдателя и 133 ответов, которые по описанной методике определяли ГКД на установке с молочным стеклом. При расчете доверительного интервала получено значение 3619±905 кд/м², что говорит о том, что разброс оценок наблюдателей составил 25%, это меньше чем в эксперименте М. Лекиша и С. Гутта (28%).

Для проверки зависимости яркости ГКД от расположения блеского источника выполнен ряд экспериментов при смещенном расположении блеского источника относительно наблюдателя на 20°. Доверительный интервал составил 6530±1477 кд/м², следовательно, разброс оценок наблюдателей — 21%, при этом полученное среднее значение больше значения в классическом эксперименте всего на 7% (рис. 3).

Для исследования зависимости яркости ГКД от яркости фона поставлен эксперимент, в котором яркость фона варьировалась от 48 до 101 кд/м² аналогично эксперименту М. Лекиша и С. Гутта (34...110 кд/м²).

График зависимости яркости ГКД от яркости фона представлен на рис. 4.



Рис. 2. Положение наблюдателя во время эксперимента

Зависимость яркости ГКД от яркости фона в эксперименте М. Лекиша и С. Гутта определяется по формуле $B = 302F^{0.44}$, где B , F — яркости блеского источника и фона.

Построена расчетная кривая с константой 1235 по формуле $B = 1235F^{0.44}$. Поскольку характер кривых совпадает, можно судить об успешности эксперимента.

Проведен ряд опытов по выявлению зависимости ГКД от размера источника (варьировался от 3,76 см в диаметре до матрицы из дискретных светодиодов размером 240). Результаты экспериментов в НИУ «МЭИ» и М. Лекиша и С. Гутта даны на рис. 5.

Результаты показывают, что с увеличением размера блеского источника яркость ГКД уменьшается, это также подтверждается данными эксперимента М. Лекиша и С. Гутта.

Итоги проведенных экспериментов на установление зависимостей значений яркости ГКД от яркости фона, размера, положения, блеского источника позволяют сделать вывод о совпадении с показателями М. Лекиша и С. Гутта.

Во второй части эксперимента использовали различные режимы включения экспериментальной установки. Наблюдателям хаотично предъявляли изображения с заданным уровнем яркости для определения ощущения по шкале дискомфорта. Всего смоделировано три изображения. Доверительный интервал составил 252±69 кд/м², что указывает на разброс по оценкам наблюдателей в 27%.

Результаты экспериментов, проведенных на кафедре светотехники, позволили выделить факторы, влияющие на зрительный дискомфорт, а соответственно, и на качество освещения в целом:

**Выборка из распределения
N(3618,9790625;2791,81292271023). Доверительный
интервал для Среднего. Сигма известна. Уровень значимости
5,00%**

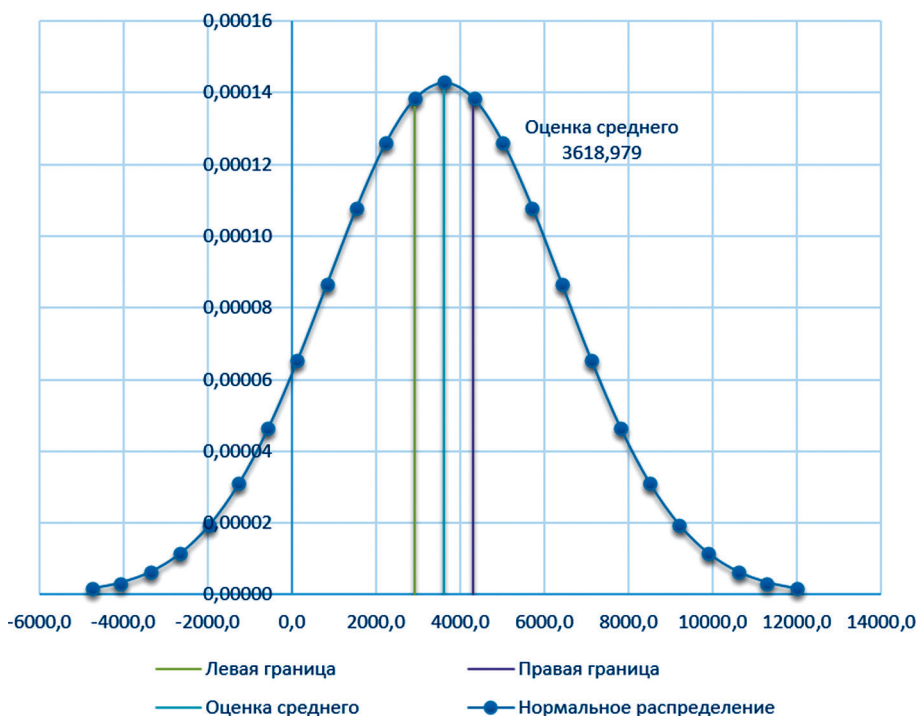


Рис. 3. Расчет доверительного интервала для распределения значений стандартной яркости ГДК в эксперименте МЭИ. Условия эксперимента: источник ($\varnothing 3,76$ см) расположен на линии зрения наблюдателя, расстояние от наблюдателя до источника — 1 м, яркость адаптации — 51 кд/м^2

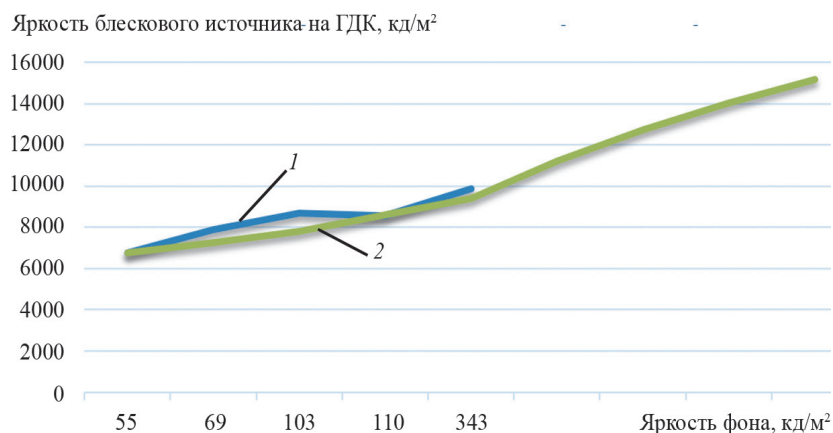


Рис. 4. Измеренная (1) и расчетная (2) зависимости яркости ГДК от яркости фона L

- распределение яркости в сцене, которое следует из результатов проверки классического эксперимента и его расширения;

- зрительную адаптацию.

Анализ результатов обоих экспериментов с круглыми малоугловыми и источниками произвольной формы подтвердил положение, выдвинутое американской ученой К. Ферри в 1915 г. о зависимости дискомфорта от пространственно-углового распределения яркости, (апробировано экспериментом М. Лекиша и С. Гута в

1949 г. и в современных условиях на кафедре светотехники НИУ «МЭИ») [18].

Исследование критерия качества на примере решения зрительной задачи

В поле зрения наблюдателя вокруг листа формировали размерный яркий блик с помощью набора матриц светодиодов. Во время эксперимента проводили съемку фотоаппаратом Nikon D3100 в формате RAW с динамическим диапазоном 12 бит. Файлы типа RAW ино-

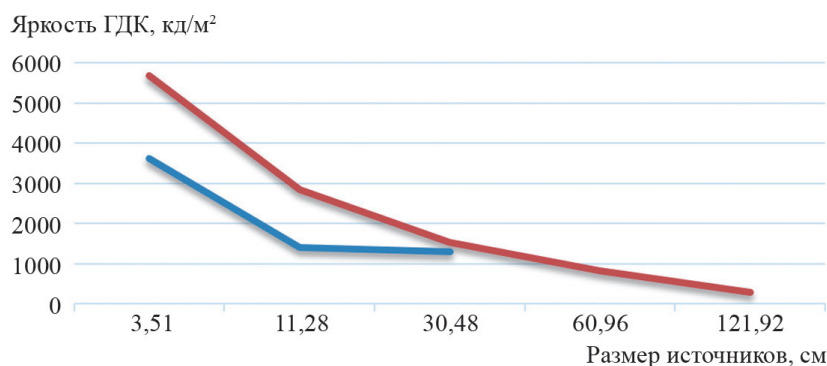


Рис. 5. Зависимость яркости источника для границы ощущений «комфорт – дискомфорт» от его размера:

— данные М. Лекиша и С. Гута; — данные МЭИ

гда называют «цифровым негативом», поскольку они играют роль, похожую на роль негатива в аналоговой фотографии. Одновременно для нормировки на максимальную яркость полученного RAW-изображения проводили съемку яркомером Konika Minolta LS-100 [14, 15].

В эксперименте в центре установки помещали лист бумаги А4 с текстом, напечатанным шрифтом Times New Roman 18 кеглем (аналог объявления на информационной доске). Наблюдатели находились на расстоянии 1,5 м от экспериментальной установки и читали текст так, как если бы посетитель читал объявление на информационной доске в каком-нибудь учреждении.

Всего было проведено два опыта с различной конфигурацией блеских источников. В первом участвовало 11, во втором — 8 человек (студенты кафедры светотехники). Доверительный интервал для первого случая — 359 ± 136 кд/м², из которого следует, что разброс оценок по наблюдателям оставляет 38%, для второго случая — 575 ± 230 кд/м², разброс оценок по наблюдателям — 40%.

Затем все изображения, снятые в формате RAW, проходили дополнительную обработку. С помощью программы Adobe DNG Converter они были переведены в формат DNG и загружены в Matlab. Поскольку RAW-формат содержит фактические необработанные исходные данные с матрицы фотоаппарата, то следует провести демозаику изображения [6, 15]. После чего полученное полноцветное 12-битное изображение переводили в оттенки серого и нормировали на яркость, измеренную яркомером Minolta. Затем в Matlab проводили непосредственно расчет предложенного критерия. В соответствии с критерием контрасты ниже определенного порога (в данном случае ниже средней яркости по фону) не учитывались. После обработки изображений были получены значения критерия качества в зависимости от средней яркости по полю зрения.

При наложении двух графиков с различным пространственно-угловым распределением яркости друг на друга получим, что доверительные интервалы для каждого из делений шкалы совпадают в относительных единицах и не пересекаются (рис. 6). Этот факт

подтверждает, что предложенный критерий качества может применяться для оценки сцен освещения с блескими источниками произвольной формы.

Результаты обработки двух экспериментов позволяют судить о корректности работы критерия качества в лабораторных условиях. Его формулировка также соответствует результатам мировых исследований в этой области. При этом определены границы применимости нового критерия качества от 35 до 1750 кд/м².

Вычисление доверительных границ погрешности оценки яркости сцены, создаваемой экспериментальной установкой

В объективных (физических) оценках точности измерений яркости экрана в условиях заданных сцен использован метод оценки погрешности. Определение доверительных границ погрешности оценки яркости экспериментальной установки (ЭУ) выполнено на примере прямых многократных измерений фона экрана при его общем освещении светильниками, установленными в аудитории (одна из возможных сцен фона без включения блеских источников света).

Результаты измерений и их статистической обработки в соответствии с ГОСТ Р 8.736—2011 и значениями неисключенных систематических составляющих погрешности

Калибровка яркомера.....	4%
Неравномерность яркости.....	5%
Нелинейность.....	1%
Доверительные границы погрешности при измерении яркости фона.....	8,9%

Составим сводную таблицу по расхождениям в ответах наблюдателей по всем описанным экспериментам.

Из анализа результатов усредненных оценок расхождений в субъективных наблюдениях сцен в лабораторных условиях видно, что проверка работы экспериментальной установки и методики проведения эксперимента прошла успешно. Большой разброс в эксперименте по проверке критерия качества обусловлен малым набором статистики. В эксперименте по проверке работы экспериментальной установки уча-

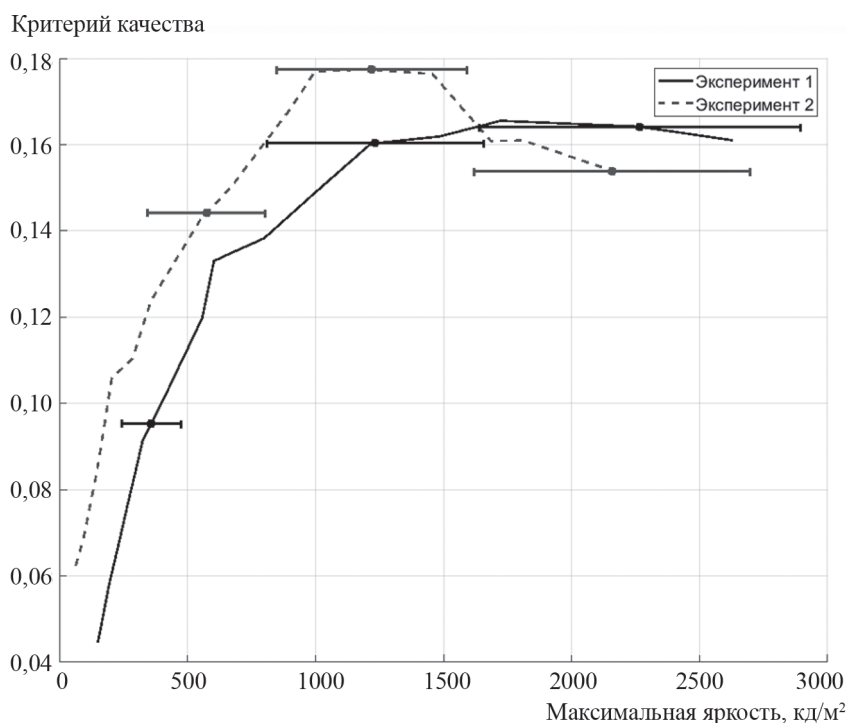


Рис. 6. Экспериментальное исследование критерия качества

Усредненные показатели расхождений в субъективных наблюдениях и оценках

Условия наблюдений	Разброс в ответах наблюдателей, %
Эксперимент М. Лекиша и С. Гута	28
Градуировка ЭУ МЭИ	
эксперимент	25
с учетом индекса позиции	21
с источниками произвольной формы	27
В эксперименте МЭИ при проверке критерия качества	
1	38
2	40

ствовало до 43 наблюдателей, в то время как при проверке критерия качества всего 10. Следует отметить, что человеческий фактор (субъективный коэффициент в законе Вебера–Фехнера) не изменился.

Обсуждение

В лабораторных условиях апробировано новое понятие — «критерий качества освещения», которое в наибольшей степени определяет степень комфорта при нахождении в помещении с определенной осветительной установкой. Предложенная формулировка позволила определить качество осветительной установки на основании пространственного-углового распределения яркости. Решена задача оценки осветительной установки в реальных условиях без ранее принятых допущений о равномерном распределении блеского источника малоуглового размера.

Разработанная и апробированная в реальных условиях на основании физического смысла понятия «дискомфорт» шкала и методика распознавания каждого из делений шкалы для испытуемых позволяет выполнять дальнейшие исследования в этой области на аналогичных экспериментальных установках с источниками неравномерной яркости неопределенной формы.

Тем не менее, необходимо дальнейшее изучение сформулированного критерия качества не только в лабораторных условиях, но на примере реальных осветительных установок. Отделка исследуемых помещений должна быть выполнена из материалов с высоким коэффициентом отражения.

Заключение

Согласно анализа полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что ощущения наблюдателя зависят от совокупности факторов, а именно, — от направления наблюдения и распределения яркости во всех точках сцены.

Эксперимент с источниками произвольной формы показал, что распределение яркости в сцене освещения и средняя яркость фона в отсутствие блеских источников — основные факторы, вносящие наибольший вклад при оценке качества освещения.

Формулировка предложенного критерия качества правомерна. Имея возможность определять пространственно-угловое распределение яркости в сцене и зная среднюю яркость фона, можно получить значение критерия качества: чем выше которое, тем дискомфортнее находится в помещении при выполнении определенной зрительной задачи.

Литература

References

1. Luckiesh M., Holladay L.L. Glare and Visibility // Trans. IES. 1925. V. 20. Pp. 221—231.
2. Luckiesh M., Guth S.K. Brightness in the Visual Field at Borderline between Comfort and Discomfort // Illuminating Eng. 1949. V. 44. No.11. Pp. 650—670.
3. Veitch J.A., Newsham G.R. Determinants of Lighting Quality II: Research and Recommendations // American Psychological Association. 104th Annual Convention. Toronto, 1996. V. 08. No. 09. Pp. 1—55.
4. Будаков В.П., Желтов В.С., Чембаев В.Д., Мешкова Т.В. Оценка качества внутреннего освещения в сценах с неравномерными блестящими источниками // GraphiCon: Труды XXVIII Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2018. С. 411—414.
5. Будаков В.П., Желтов В.С., Мешкова Т.В., Нотфуллин Р.Ш. Оценка качества освещения на основе пространственно-углового распределения яркости // Светотехника. 2017. № 3. С. 17—22.
6. CIE Proc. No.71. 21st Session. Venice. – Paris: CIE, 1987.
7. Klej A. e. a. Flicker (pstlm) and Stroboscopic Effect (svm) — Light Measurements in Photometrical Laboratories. Signify Developed Setup and Validation Method // Proc. 29th Session CIE. Washington, 2019. V. 1. Pp. 3—6.
8. Thorseth A. e. a. Measuring and Comparing Waveforms of Temporal Light Modulation // Ibid. Pp. 7—16.
9. Wang L.L. e. a. The Visibility of the Phantom Array Effect Under Office Lighting Condition // Ibid. Pp. 17—21.
10. Pierson C. e. a. Discomfort Glare Cut-off Values from Field and Laboratory Studies // Ibid. Pp. 295—305
11. Giovannini L. e. a. Annual Evaluation of Daylight Discomfort Glare: State of the Art and Description of a New Simplified Approach // Ibid. Pp. 306—316.
12. Iodice M. e. a. Testing Experimental Methods for Discomfort Glare Investigations // Ibid. Pp. 317—324.
13. Iwata T. e. a. Effects of Luminance Distribution and View on Evaluation of Discomfort Glare from Windows // Ibid. Pp. 325—332.
14. Wu C. e. a. Visual Comfort Evaluation Method and Prediction Model Relating to Discomfort Glare: a Mock-up Study of Luminous Environment in Airplane Cockpit // Ibid. Pp. 610—614.
15. Ye C.H. e. a. Test Method of Luminance Dynamic Range for HDR Camera with CMOS Image Sensor // Ibid. Pp. 629—635.
16. Long J. Visual Discomfort Associated with Ceiling Luminaires: Observations, Trends and Challenges 2009—2018 // Ibid. Pp. 1425—1433.
17. Funke C., Schierz Ch. Extension of the Unified Glare Rating Formula for Non-Uniform Led Luminaires // Proc. 12th Lux Junior Conf. Ilmenau, 2015. Pp. 80—81.
18. Ferre C., Rand G. The Efficiency of the Eye under Different Conditions of Lighting // Trans. IES. 1914. V. 10. Pp. 407—415.

1. Luckiesh M., Holladay L.L. Glare and Visibility. Trans. IES. 1925;20:221—231.
2. Luckiesh M., Guth S.K. Brightness in the Visual Field at Borderline between Comfort and Discomfort. Illuminating Eng. 1949;4;11:650—670.
3. Veitch J.A., Newsham G.R. Determinants of Lighting Quality II: Research and Recommendations. American Psychological Association. 104th Annual Convention. Toronto, 1996;08;09:1—55.
4. Budakov V.P., Zheltov V.S., Chembaev V.D., Meshkova T.V. Otsenka Kachestva Vnutrennego Osveshcheniya v Stsenakh s Neravnomernymi Bleskimi Istochnikami. GraphiCon: Trudy XXVIII Mezhdunar. Konf. po Komp'yuternoy Grafike i Mashinnomu Zreniyu. Tomsk: Izd-vo Tomskogo Gos. Un-ta, 2018:411—414. (in Russian).
5. Budakov V.P., Zheltov V.S., Meshkova T.V., Notfullin R.Sh. Otsenka Kachestva Osveshcheniya na Osnove Prostranstvenno-uglovogo Raspredeleniya Yarkosti. Svetotekhnika. 2017;3:17—22. (in Russian).
6. CIE Proc. No.71. 21st Session. Venice. – Paris: CIE, 1987.
7. Klej A. e. a. Flicker (pstlm) and Stroboscopic Effect (svm) — Light Measurements in Photometrical Laboratories. Signify Developed Setup and Validation Method. Proc. 29th Session CIE. Washington, 2019;1:3—6.
8. Thorseth A. e. a. Measuring and Comparing Waveforms of Temporal Light Modulation. Ibid:7—16.
9. Wang L.L. e. a. The Visibility of the Phantom Array Effect Under Office Lighting Condition. Ibid:17—21.
10. Pierson C. e. a. Discomfort Glare Cut-off Values from Field and Laboratory Studies. Ibid:295—305
11. Giovannini L. e. a. Annual Evaluation of Daylight Discomfort Glare: State of the Art and Description of a New Simplified Approach. Ibid:306—316.
12. Iodice M. e. a. Testing Experimental Methods for Discomfort Glare Investigations. Ibid:317—324.
13. Iwata T. e. a. Effects of Luminance Distribution and View on Evaluation of Discomfort Glare from Windows. Ibid:325—332.
14. Wu C. e. a. Visual Comfort Evaluation Method and Prediction Model Relating to Discomfort Glare: a Mock-up Study of Luminous Environment in Airplane Cockpit. Ibid:610—614.
15. Ye C.H. e. a. Test Method of Luminance Dynamic Range for HDR Camera with CMOS Image Sensor. Ibid:629—635.
16. Long J. Visual Discomfort Associated with Ceiling Luminaires: Observations, Trends and Challenges 2009—2018. Ibid:1425—1433.
17. Funke C., Schierz Ch. Extension of the Unified Glare Rating Formula for Non-Uniform Led Luminaires. Proc. 12th Lux Junior Conf. Ilmenau, 2015:80—81.
18. Ferre C., Rand G. The Efficiency of the Eye under Different Conditions of Lighting. Trans. IES. 1914;10:407—415.

19. **Safdar M., Ronnier M.L.** A Neural Response-based Model to Predict Discomfort Glare from Luminance Image // *Lighting Res. Techn.* 2016. V. 50 (3). Pp. 1—13.

20. **Hirning Mi.** The Application of Luminance Mapping to Discomfort Glare: a Modified Glare Index for Green Buildings. Queensland: Queensland University of Technology Discipline of Physics, 2014.

19. **Safdar M., Ronnier M.L.** A Neural Response-based Model to Predict Discomfort Glare from Luminance Image. *Lighting Res. Techn.* 2016;50 (3):1—13.

20. **Hirning Mi.** The Application of Luminance Mapping to Discomfort Glare: a Modified Glare Index for Green Buildings. Queensland: Queensland University of Technology Discipline of Physics, 2014.

Сведения об авторах:

Будак Владимир Павлович — доктор технических наук, профессор кафедры светотехники НИУ «МЭИ», Член-корреспондент академии электротехнических наук РФ, e-mail: BudakVP@mpei.ru

Желтов Виктор Сергеевич — кандидат технических наук, ассистент кафедры светотехники НИУ «МЭИ», e-mail: zheltov@list.ru

Мешкова Татьяна Валерьевна — аспирант кафедры светотехники НИУ «МЭИ», e-mail: tvmesh@mail.ru

Чембаев Виктор Дмитриевич — аспирант кафедры светотехники НИУ «МЭИ», e-mail: chembervint@gmail.com

Information about authors:

Budak Vladimir P. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI, Corresponding Member of the Academy of Electrical Sciences of the Russian Federation, e-mail: BudakVP@mpei.ru

Zheltov Viktor S. — Ph.D. (Techn.), Assistant of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: zheltov@list.ru

Meshkova Tatyana V. — Ph.D.-student of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: tvmesh@mail.ru

Chembaev Viktor D. — Ph.D.-student of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: chembervint@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 27.05.2019

The article received to the editor: 27.05.2019